杂散光可视化分析模型在高功率激光装置中的辅助设计和应用

莫 磊[1] 刘兰琴[1] 王 方[1] 王文义[1] 赵瑛峰[2] 葛双全[2] 张 颖[1] 粟敬钦[1]

([1]中国工程物理研究院激光聚变研究中心，四川 绵阳 621900
[2]中国工程物理研究院计算机应用研究所，四川 绵阳 621900)

摘要 针对高功率激光装置，基于自研鬼像追迹软件(GA)的鬼像分析结果，采用辅助设计方法在装置的三维结构模型中形象、直观地显示鬼像的分布情况，精确计算出鬼像光束传输过程中与装置的干涉情况；并对典型未知的鬼像危害进行分析，提出了可采取的规避措施。所开发的软件能够满足高功率激光装置不同要求的鬼像分析计算，其分析结果直接应用于装置的设计，对于缩短设计周期、提高光束质量、降低装置造价具有重要意义及明确的应用前景。

关键词 光学设计；杂散光；鬼像；鬼像可视化；高功率固体激光装置

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**：10.3788/AOS201131.s100516

CAD and Application of Stray-Light Visualization Analysis Model in a High-Power Laser System

Mo Lei[1] Liu Lanqin[1] Wang Fang[1] Wang Wenyi[1] Zhao Yinfeng[2]
Ge Shuangquan[2] Zhang Ying[1] Su Jingqin[1]

([1] *Laser Fusion Research Center*, *China Academy of Engineering Physics*, *Mianyang*, *Sichuan* 621900, *China*
[2] *Computer Application Institute*, *China Academy of Engineering Physics*, *Mianyang*, *Sichuan* 621900, *China*)

Abstract According to the analysis of stray light in high power solid-state laser system, ghost image is 3D demonstrated in the structure model of the facility by ghost-analysis (GA) software. The simulation model to describe ghost-image distribution is also established. The position of the one-or-more-order ghost image in the facility can be fully displayed in all directions so that the ghost-image harm can be avoided. This paper takes some of the "dangerous surfaces" as example, simulating the energy distribution on it by tracing numerous real rays. According to the shape of ghost energy and its corresponding optical stucture, suggestions are made to effectively mitigate the damage on the srudied optical surfaces. This analytical result is in good accordance with that in practice. It is proven that such an analytical method has provided a detailed reference for mitigation of ghost-caused damage.

Key words optical design; stray light; ghost image; ghost-image visualization; high-power solid-state laser system

OCIS codes 220.0220; 140.0140; 100.0100

1 引 言

在大型高功率激光装置中，杂散光分析室非常繁琐复杂。装置中的光学表面上数量多，随着杂散光所产生的鬼像阶数增加，产生的鬼像数目十分庞大。能否准确分析和追溯到对系统造成危害的鬼像是系统设计非常重要的环节。在一些开展惯性约束聚变研究较成熟的国家，在建造高功率激光装置的同时，一直在不断发展计算机的模拟设计和仿真能力。我国高功率固体激光驱动器技术的研究虽然起步早，但在相应的计算机数值模拟和仿真研究水平相对滞后，没有能够支撑装置全系统光传输过程中杂散光分析的数值分析工具，这使得我国激光驱动器的总体设计能力与国外发达国家有相当的差距。现代的杂散光仿真软件多种多样，有 FRED、ASAP、LIGHTTOOLS 等软件，但是基于高功率固体激光装置这样庞大系统的杂散光仿真软件尚未成熟。

收稿日期：2011-03-28；**收到修改稿日期**：2011-04-15

基金项目：国家 863 计划资助课题。

作者简介：莫 磊(1982—)，男，研究实习员，主要从事光学设计方面的研究。E-mail：molei0223@163.com

本文针对高功率激光装置，基于自研鬼像追迹软件的鬼象分析结果[1,2]，采用辅助设计方法在装置的三维结构模型中形象、直观地显示鬼像的分布情况，精确计算出鬼像光束传输过程中与装置的干涉情况；并对典型位置的鬼像危害进行分析，提出了可采取的规避措施。与现有杂散光分析软件相比，自研开发的杂散光分析软件更适用高功率固体激光装置。研究结果为高功率激光装置的杂散光管理和系统优化设计提供了有效的参考依据[3,4]。

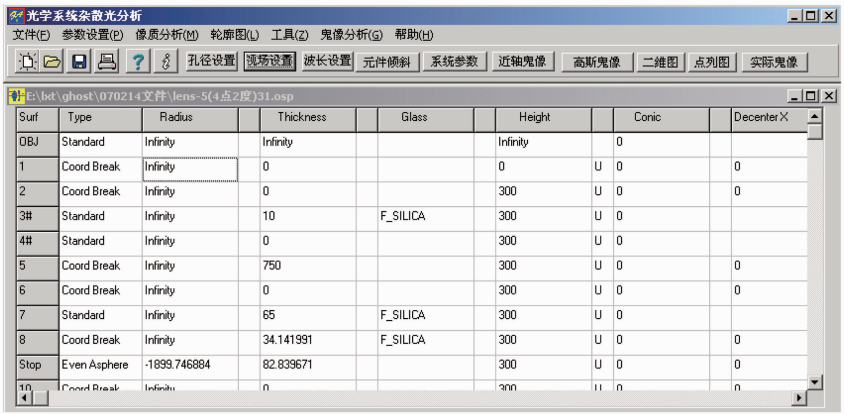
2　软件设计思路简述

2.1　杂散光分析软件

杂散光分析软件(GA)的研究是为了在对高功率激光装置中的杂散光进行分析时，采用更合理的输出方法，为含杂散光的激光系统可视化仿真输出提供有效数据文件，从而找出可能产生危害的所有鬼像及其形成原因，为高功率激光装置的优化设计及正常运转提供分析依据。

项目研究目标包括建模和软件开发两部分，即对确定的激光装置用 GA 软件建模；按照约定的数据要求和数据格式开发 GA 软件。在 GA 软件上根据所提供的数据建立系统模型，要求完整、准确地描述整个系统，可以用于激光光束质量的评价和杂散光分析。GA 输出模块的开发，主要是用于三维系统光束传输图所使用，输出的数据内容保证三维图绘制的完整性。

所采用的杂散光分析软件基本结构和主界面如图 1 所示。



Surf	Type	Radius	Thickness	Glass	Height		Conic	Decenter X
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity		0	
1	Coord Break	Infinity	0		0	U	0	0
2	Coord Break	Infinity	0		300	U	0	0
3#	Standard	Infinity	10	F_SILICA	300	U	0	
4#	Standard	Infinity	0		300	U	0	
5	Coord Break	Infinity	750		300	U	0	0
6	Coord Break	Infinity	0		300	U	0	0
7	Standard	Infinity	65	F_SILICA	300	U	0	
8	Coord Break	Infinity	34.141991	F_SILICA	300	U	0	0
Stop	Even Asphere	-1899.746884	82.839671		300	U	0	0
10	Coord Break	Infinity	0		300	U	0	0

图 1　杂散光分析软件的主页

Fig. 1　Homepage of stray light analysis software

2.2　杂散光可视化软件

杂散光可视化分析模块的研究是为了对高功率激光装置中的主光路和杂散光与主机装置的干涉情况进行可视化显示，从而找到空间干涉区域及光束能量分布，为下一步在某些干涉区域安装吸能材料提供技术指导，从而避免激光光束作用到光机装置后产生的灰尘、金属屑和变形等对光束质量的影响。

研究目标包括模型简化和软件开发两部分。模型简化部分是建立光学系统的简化计算模型，简化后的模型保持原有 Pro/E 模型外形尺寸；软件开发部分包括杂散光干涉计算及其三维可视化显示。

3　杂散光可视化分析模型在装置中的应用

在杂散光可视化软件分析过程中，根据不同光束可视化分析内容，将装置划分为 3 个区域，即建立主放大系统、终端光学组件和真空靶室 3 大部分的可视化模型，简化后的模型保持原有 Pro/E 模型外形尺寸。杂散光可视化仿真包括主放大系统、终端光学组件和真空靶室 3 部分，每一部分又包括会聚点、理想光路、实际光路和装置 4 部分内容。软件开发部分包括杂散光干涉计算及其三维可视化显示，其中杂散光干涉计算能够得到杂散光与光机模块作用位置、作用区域大小等杂散光仿真结果，杂散光的三维可视化显示能够显示杂散光的三维空间分布，并能够提供多种显示模式，以不同视觉方向观察仿真结果。图 2 和图 3 给出了软件可视化分析针对各模块的分析界面示意图。

通过全系统杂散光可视化分析模型的建立，确认选取的各光学参数能够保证三阶以下的鬼像点未直接落在光学元件上；在后期采取管理措施的同时，首先对个别关键参数进行控制，对能量较大的鬼像点设计特殊吸收体加以光束吸收；对具有一定风险的鬼像点，在装置低通量运行时必须加以注意，以保

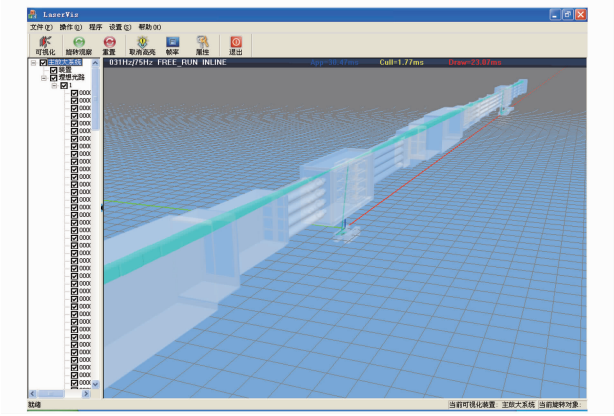


图 2　主放大系统模块杂散光可视化分析模型示意图

Fig. 2　Schematic of stray-light visualization analysis model of main amplification system module

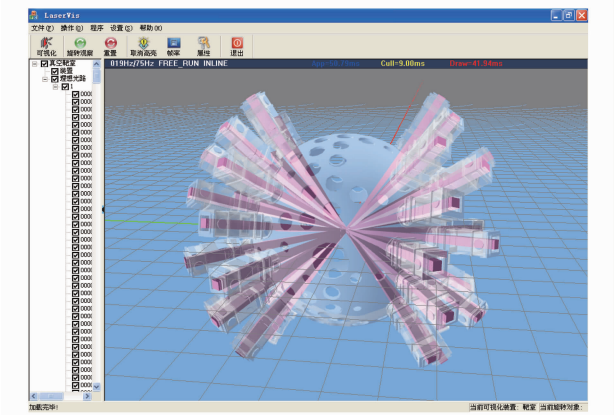


图 3　靶室模块杂散光可视化分析模型示意图

Fig. 3　Diagram of stray light visualization analysis model of target chamber

证装置在高通量运行时，将鬼像点破坏的风险降到最低；在小孔转轮和小孔板的选材及加工时考虑到具有一定的吸收激光和抗激光辐照的能力；由于小孔转轮附近的杂散光分布较多，因此考虑对小孔转轮前后一个相当长的管壁上进行特殊处理，用于吸收杂散光，以保证无镜面反射。

4　典型鬼像分析

根据美国 LLNL 实验室 Hendrix 等的研究(UCRL-JC-129754，1998)，针对杂散光的能量密度的不同将杂散光分为危害程度不同的 4 类，其中大于 20 J/cm^2 时，都会对光学元件造成直接破坏；大于 20 J/cm^2 而小于 1000 J/cm^2 时光学膜层损伤，降低光学传输的质量，在此强度的照射下，光学玻璃材料开始汽化，金属和聚合物将爆发性的熔化；当杂散光大于 1000 J/cm^2 时，在很多环境下导致空气电离，光束能量被等离子体吸收或者发散，导致光束质量降低和能量损失。光学材料将被熔化，大部分金属和聚合物将爆发性的熔化(在干燥清洁的空气中，1 ns/1μm 脉冲)。因此必须考虑采取主动措施进行杂散光吸收和规避[5~7]。

图 4 所示为主放光路中某一阶鬼像，经过模拟计算和分析，二程光和四程光在 L3 透镜第二面上的剩余反射，经放大器 AMP2 放大后，由 L2 会聚，被小孔转轮 PA1 遮挡，光斑口径约 30 mm×30 mm。对于二程光形成鬼像能量约 3J，能量密度约 0.33 J/cm^2，当该鬼光束作用在金属上，不会引起破坏。而四程光形成鬼像能量约 382 J，能量密度约 42.4 J/cm^2，因此需要采取主动措施来规避鬼像。

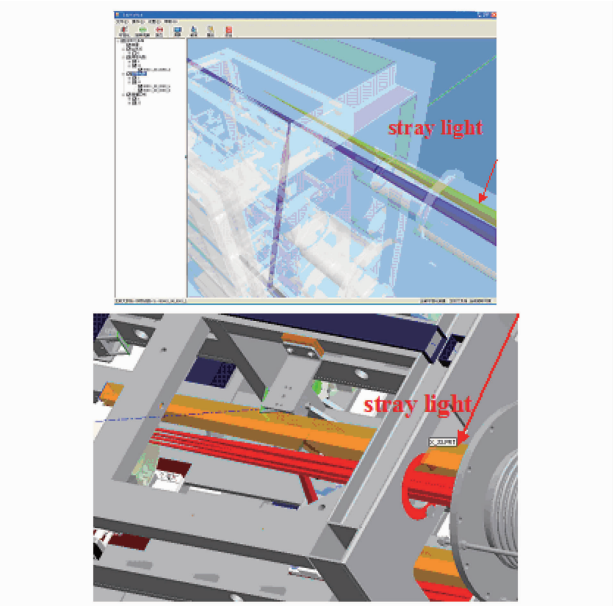


图 4　鬼像分析事例。(a)杂散光分析软件示意图，(b) 机械结构模型校对示意图

Fig. 4　Analysis of ghost image. (a) stray light analysis software, (b)mechanical structure model proofing

经过分析和验证，需通过控制透镜的角度(0.13°)，使鬼光束进入内腔空间滤波器(CSF)中箱体内，根据目前具体结构该鬼光束在到达 PA1 小孔附近之前，还要经过监视 CCD 结构、注入反射镜结构，会被 CSF4×2 支架的“基准端板”遮挡，因此考虑通过在“基准端板”固定吸收体来规避和遮挡该鬼光束。吸收位置和吸收体设计如图 5 所示。

杂散光可视化仿真程序把干涉计算得到的理想光路三维可视化模型、真实光路三维可视化模型、与光路发生干涉的光机装置可视化模型、光机装置可视化模型和计算得到的鬼点坐标根据需求加以三维可视化显示，结合计算得到的数据库中的信息，提供灵活方便的可视化交互界面，用户可以使用鼠标、键

盘等输入设备在三维场景中观察系统各个部分，将为装置的工程建造和杂散光管理提供重要依据。

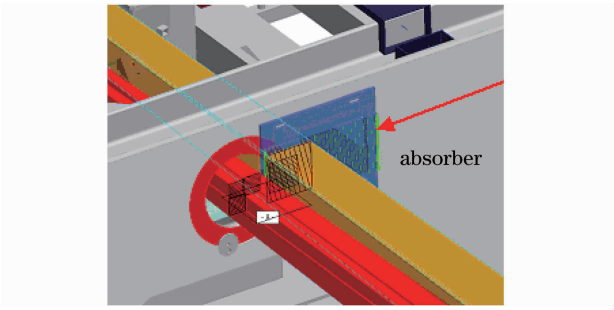


图 5　规避措施示意图

Fig. 5　Preventive measures

5　结　　论

杂散光可视化分析模型涉及大型激光装置，因而在分析过程中所产生的数据量相当庞大，随着鬼像阶数的增加，对运算速度和硬件设备的要求也不断提高，如何解决数据量和运算速度之间的冲突是目前软件开发后续处理中的重要环节。

杂散光可视化分析模型的设计是为高功率固体激光装置设计的杂散光分析量身打造的，因而与一般的光学设计及分析软件相比，有自己的功能和特点，同时，根据装置的特点，要求分析模型能够不断适应实际分析需要，进一步进行功能完善。另外，如何将可靠性分析方法有效地应用于仿真系统分析来控制仿真系统的质量，仍需要深入研究，这将是下一步的研究目标。

参　考　文　献

1 Deng Shitao, Li Xiaotong, Ceng Zhaofeng *et al.*. Mitigating damage of the ghost in high power laser facilities by real ray trace [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 585～588
邓诗涛，李晓彤，岑兆丰 等. 高功率激光装置中鬼像的模拟-应用实际光线追击法[J]. 光学学报，2005，**25**(5)：585～588

2 Cen Zhaofeng, Li Xiaotong, Zhu Qihua *et al.*. Stray light analysis for optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(3): 300～304
岑兆丰，李晓彤，朱启华 等. 光学系统杂散光分析[J]. 红外与激光工程，2007，**36**(3)：300～304

3 Tan Jichun, Jing Feng, Zhu Qihua *et al.*. Stray light inside multi-pass laser cavity of the SG-Ⅲ prototype module[J]. *High Power Laser and Partical Beams*, 2000, **12**(2): 159～163
谭吉春，景　峰，朱启华 等. 多通放大器腔内的杂散光[J]. 强激光与粒子束，2000，**12**(2)：159～163

4 Li Xiaotong, Cen Zhaofeng, He Zhiping *et al.*. Data structure of stray light analyzing in high power laser systems[J]. *Laser and Infrared*, 2002, **32**(5): 295～297
李晓彤，岑兆丰，何志平 等. 大功率激光光学系统杂散光分析的数据结构[J]. 激光与红外，2002，**32**(5)：295～297

5 Ma Zairu, Liu Wenbing, Feng Guoying *et al.*. The position formulations of the low-order ghost images in the high power laser system[J]. *Laser J.*, 2003, **23**(4): 55～58
马再如，刘文兵，冯国英 等. 高功率激光系统的低阶鬼点位置公式[J]. 激光杂志，2003，**23**(4)：55～58

6 Wang Fang, Zhu Qihua, Zhang Qingquan *et al.*. The relations between the first-order ghost image and the focal length in the high power laser facility[J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(3): 334～336
王　方，朱启华，张清泉 等. 高功率激光装置中透镜一阶鬼点形成规律分析[J]. 激光技术，2005，**29**(3)：334～336

7 Deng Shitao, Li Xiaotong, Cen Zhaofeng *et al.*. Paraxial calculation and analysis of the ghost in technical integration line [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(9): 10～13
邓诗涛，李晓彤，岑兆丰 等. 神光Ⅲ原型装置中鬼像的近轴计算与分析[J]. 光电工程，2004，**31**(9)：10～13